



TITLE:

Mathematical and Numerical Approaches  
for Transport Phenomena in Surface Water  
Networks( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

Yoshioka, Hidekazu

---

CITATION:

Yoshioka, Hidekazu. Mathematical and Numerical Approaches for Transport Phenomena in Surface Water Networks. 京都大学, 2016, 博士(農学)

ISSUE DATE:

2016-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r13021>

RIGHT:

( 続紙 1 )

京都大学	博士（農学）	氏名	吉岡秀和
論文題目	Mathematical and Numerical Approaches for Transport Phenomena in Surface Water Networks (地表水ネットワークにおける輸送現象に対する数理・数値的アプローチ)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>河川や用・排水路などの地表水に生じる水の流動や溶質輸送現象の解析を行うことは、流体力学や水理学などの基礎学問分野、ならびに農業工学や環境工学などの応用学問分野の両観点から意義深い。従来、こうした輸送現象に対しては、様々な物理学的根拠から導かれる微分方程式系を支配方程式とした解析手法の適用がなされてきた。しかしながら、とくに溶質輸送現象に対しては、それが本質的に確率論的な現象であるにもかかわらず、これまで決定論に基づいたアプローチが主流であった。また、地表水体の多くは河川網に見られるようにネットワーク構造を有する(地表水ネットワーク)ことから、実用上は、地表水ネットワークに生じる輸送現象を一貫的に記述でき、なおかつ効率的に求解できるモデルを用いた解析がなされることが望ましい。とくに、水路の分岐・合流点を数物的な観点から合理的に取り扱うことができる手法の必要性は大きい。</p> <p>本論文では、地表水ネットワークに生じる水と溶質の輸送現象を記述する数理モデルの提案、ならびに各モデルが有する解を安定的かつ精緻に近似する数値計算手法の開発を目的とする。本論文は全8章で構成される。第1, 2章では本研究の問題背景と研究目的を述べるとともに、既往研究に関する文献レビューを行う。第3章では、地表水ネットワークの分岐・合流点を数物的な観点から合理的に扱うことができる浅水流モデルを提案する。第4章では、確率過程の概念に基づいて溶質の輸送現象を記述する微分方程式系を導き、実測結果に基づいてその妥当性を検証する。第5, 6, 7章では、第3, 4章で導かれた各モデルに対する数値計算手法を提案し、その精度検証と実問題への応用を行う。最後に、第8章では本論文の総括ならびに今後の研究展望を示す。</p> <p>本論文における主要な研究成果のうち、数理モデル化については以下の2点に要約できる。</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. 浅水流モデルは、質量保存則を記述する連続方程式と運動量保存則を記述する運動量方程式から構成される非線型双曲型偏微分方程式系である。連続方程式については、地表水ネットワークの分岐・合流点における質量保存則を満足し、分岐・合流点とそれ以外の点を一貫的に処理する定式化を示した。また、運動量方程式については、分岐・合流点の上流側から下流側に向かい運動量の非増大性を満足する内部境界条件（運動量フラックス評価スキーム）を提案した。さらに、運動量フラックス評価スキームの観点から既存の内部境界条件について検討し、それらが必ずしも運動量の非増大性を満足しないことを解析的に示した。</li><li>2. 乱流場における溶質粒子のラグランジュ的挙動を記述する伊藤型の確率微分方程式を提示した。また、粒子位置の確率密度関数を支配するコルモゴロフ前進</li></ol>			

方程式ならびに後退方程式を示した．コルモゴロフ前進方程式からは溶質濃度の輸送方程式を導出することができることを示した．また，コルモゴロフ後退方程式からは，領域内のある点から粒子が特定の領域境界に到達する確率や平均時間といった空間分布統計量の支配方程式を導出した．さらに，実際の農業用排水路において取得された複数点における3次元流速時系列データと統計検定に基づいて，確率微分方程式の妥当性を検証した．

つぎに，数値計算手法については以下の2点に要約できる．

- 3．上記項目1で示した浅水流モデルを地表水ネットワークにおいて一貫的に数値求解するための有限体積スキーム（DFVFスキーム）を開発した．DFVFスキームでは，連続方程式を節点中心型の有限体積法，運動量方程式をセル中心型の有限体積法に基づいて離散化する．各種ベンチマーク問題や開水路における水理実験結果，仮想的な問題への適用結果から，DFVFスキームが浅水流モデルを求解するための極めて有効な数値計算手法であることを示した．さらに，2011年の東北地方太平洋沖地震時に決壊した福島県の藤沼ダムを対象に，DFVFスキームによるダム決壊洪水の数値シミュレーションを行った．数値シミュレーション結果は，得られた流れ場が実際に生じた決壊洪水と整合することを示した．
- 4．地表水ネットワークにおける溶質輸送方程式ならびに空間分布統計量の支配方程式に対する数値計算手法を提案した．前者は節点中心型の有限体積スキーム（DFVSスキーム），後者は有限要素スキーム（PGFEスキーム）である．各スキームは方程式の特性に応じた異なる離散化手法に基づくが，局所的な解析解に基づいた離散化を行うという共通点を有する．DFVSスキームについては安定性解析とテスト問題および仮想的な問題への適用，PGFEスキームについては安定性解析および収束性解析により妥当性を検証した．

以上のように，本論文は，提案する地表水ネットワークにおける輸送現象に対する数理・数値モデル化手法が高い有用性を有することを示している．

注) 論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合わせて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100 wordsで作成し  
審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、地表水ネットワークに生じる水の流れや溶質の輸送現象に対する理論構成と実現象への応用を目的として、現象に対する数理・数値モデリングを行った。提案する数理モデルならびに数値計算手法を用いて、数理・数値解析、テスト問題や仮想問題、さらには実問題への適用を通し、モデリングの妥当性を論じた。本論文において評価に値する点は以下に示すとおりである。

1. 地表水に生じる溶質輸送現象を確率論の立場から解釈し直し、流れ場における溶質粒子の挙動を記述する確率微分方程式を基点とする現象の新しい定式化を示した。この定式化の妥当性を、実際の地表流において取得した流速時系列データに対する統計検定の適用により検証した。また、確率微分方程式の有する諸性質に基づき、溶質輸送方程式を導いた。さらに、数理モデル化では、溶質輸送現象が有する不確実性を統計的な観点から記述することができる空間分布統計量の支配方程式を導いた。
2. 地表水ネットワークにおける水の流れを一貫的に記述する浅水流モデルを提案した。連続方程式について、分岐・合流点とそれ以外の点を一貫的に処理し、内部境界条件を陰的に含む定式化を提案した。また、運動量方程式について、分岐・合流点において運動量の非増大性を満足する内部境界条件（運動量フラックス評価スキーム）を提案した。
3. 地表水ネットワークの分岐・合流点を一貫的かつ精緻に扱うことができる輸送現象の数理モデルに対する数値計算手法の提案と検証を行った。浅水流方程式、溶質輸送方程式、空間分布統計量の支配方程式、それぞれに対する数値計算手法として、有限体積法に基づくDFVFスキーム、有限体積法に基づくDFVSスキーム、有限要素法に基づくPGFEスキームを提案した。各スキームに対しては、誤差解析、テスト問題、仮想的な問題、実問題への応用などを行い、実現象の解析に対する適用性の高さを示した。

以上のように、本論文は、地表水ネットワークに生じる輸送現象に対して新たな視点から理論構築を行うとともに、提案する数理・数値モデルの検証と実問題への応用を行ったものであり、数値流体力学、環境水理学、水資源利用工学の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、平成28年2月9日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士（農学）の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。

注) 論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。

ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することと支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日：          年          月          日以降（学位授与日から3ヶ月以内）